

普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机控制

许大中 贺益康 编著

浙江大学出版社



(第二版)

普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机控制

(第二版)

许大中 贺益康 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书主要论述电力电子技术在电机能量变换、速度调节、特性控制中的应用,以及在电力电子装置非正弦供电下电机的运行特性。其内容是电机原理、电力电子技术、控制理论和微机控制技术的有机结合,体现了电子、信息等高新技术对传统电机技术的改造及当今电机行业发展的新趋势。

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材,全国高等学校电气工程及其自动化专业统编教材,也可供电机电器专业研究生作为教学参考用书。对从事电机、电力电子技术和电力传动领域的设计、研究及运行的工程技术人员也有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电机控制 / 许大中, 贺益康编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2002. 7

ISBN 7-308-02919-0

I. 电... I. ①... ②贺... III. 电机—控制
N. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 002561 号

责任编辑: 李桂云

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 浙江大学印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 15

字 数: 384 千

版 印 次: 2002 年 7 月第 2 版 2002 年 7 月第 4 次印刷

书 号: ISBN 7-308-02919-0/TM·015

定 价: 22.00 元

前 言

《电机控制》一书最早是根据 1992 年 9 月全国高等学校电机专业教学指导委员会第六次全体(扩大)会议讨论通过的电机控制课程教材编写大纲编写的,1995 年 2 月由浙江大学出版社出版,并作为全国高等学校电机及其控制专业的统编教材在全国发行。经过国内各高校同类专业五年的使用,反映良好。1999 年 11 月全国高等学校电机电器及其控制专业教学指导委员会第三次会议上,决定再次编写《电机控制》,作为面向 21 世纪的推荐教材,仍由浙江大学出版社出版,争取列入教育部面向 21 世纪课程教材规划。近年来,电机电器及其控制专业又进一步拓宽为电气工程及其自动化专业,为适应更宽广的专业方向改造及教学改革的需要,进一步将电子、信息等高新技术引入传统电工(电机)学科,作者对原书内容进行了大幅度的全面修订,重新编写出《电机控制》(第二版),2002 年 5 月本书通过了教育部评审,被列入普通高等教育“十五”国家级规划教材,作为全国高等学校电气工程及其自动化专业的专业课统编教材。本书也可用作电机、电器专业研究生的教学参考书。

本书内容共分六章。第一章为直流电机的控制,介绍了直流电动机的相控调压调速和直流脉宽(PWM)调速,分析了双闭环直流调速系统的构成和工作原理,系统讨论了双闭环调速系统实现优化设计的工程方法。第二章为异步电机的控制,首先系统地介绍了异步电机各种调速方法的机理及分类,讨论了交流调压调速、电磁滑差调速、串级调速、双馈调速及变极调速技术。变频调速是本章重点,结合电机原理、电力电子技术,分别从变频调速理论、静止变频器(特别是 PWM 调制方法)、变频调速系统及高性能的矢量变换控制等几个方面进行了详细讨论,充分展现了交流电机变频调速与电力电子技术之间的密切关系。第三章为同步电机的变频调速,分别介绍了同步电动机它励式及自控式变频调速系统的工作原理和系统构成,以及同步电机的矢量变换控制技术。第四章为同步发电机的励磁控制,这是电机电子控制的另一重要内容。本章首先介绍了同步发电机对励磁系统的基本要求,随后系统地讨论了它励式、自励式和自复励等典型的励磁系统,对于 20 世纪 90 年代出现的先进交流励磁发电技术也结合作者研究成果进行了详细介

绍。第五章为位置检测式调速电机及其控制,这是一类以带位置检测器为特征的机电一体化新型调速电机系统,包括永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机。本章全面讨论了它们的原理、构造、调速系统构成及其控制。第六章为电机的微机控制,即微机技术在电机控制领域的应用。本章仅从电机控制的数字实现角度简明地讨论了电机采用微机控制的特点及优势,最基本的硬、软件技术;并以直流电机 PWM 可逆调速、交流电机 SPWM 变频调速为例,介绍了具体的微机控制实现方法。作为一本完整的教材,本书各章均配备有一定数量的思考题和习题,以利学习。

本书由浙江大学许大中教授和贺益康教授编写,其中第一章、第二章的 § 2-1 ~ § 2-4、第四章、第五章的 § 5-3 由许大中编写,其余部分由贺益康编写。本书由上海交通大学李仁定教授主审,他对编写工作提出了许多宝贵的意见,编者对此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳切希望读者批评指正。

编著者

2002 年 1 月于浙江大学

目 录

绪论	1
第一章 直流电动机的控制	8
§ 1-1 晶闸管供电直流电动机的机械特性	8
§ 1-2 晶闸管—直流电动机调速系统	11
§ 1-3 直流电动机的脉宽调制(PWM)调速	19
§ 1-4 直流电动机调速系统的特性及其优化	24
§ 1-5 晶闸管供电对直流电动机换向的影响	40
思考题与习题	44
第二章 异步电机的控制	45
§ 2-1 异步电动机的调速方法	45
§ 2-2 异步电动机的调压调速	47
§ 2-3 电磁滑差离合器(电磁调速电机)	51
§ 2-4 绕线式异步电动机的调速	53
§ 2-5 异步电动机变极调速	62
§ 2-6 异步电机变频调速理论	65
§ 2-7 静止变频器	79
§ 2-8 异步电机变频调速系统	100
§ 2-9 异步电机矢量变换控制	107
思考题与习题	120
第三章 同步电动机的变频调速控制	122
§ 3-1 同步电动机的结构形式和运行性能	123
§ 3-2 无换向器电机(自控式同步电动机变频调速系统)	127
§ 3-3 同步电动机矢量变换控制	137
思考题与习题	142
第四章 同步发电机的励磁控制	143
§ 4-1 对同步发电机励磁的基本要求	143
§ 4-2 它励式励磁系统	147
§ 4-3 自励式半导体励磁系统	151
§ 4-4 相复励励磁系统	154

§ 4-5 交流励磁发电	158
思考题与习题	163
第五章 位置检测式调速电机及其控制	164
§ 5-1 永磁无刷直流电动机原理	164
§ 5-2 永磁无刷直流电动机的控制	172
§ 5-3 开关磁阻电动机原理	177
§ 5-4 开关磁阻电动机的控制	183
思考题与习题	190
第六章 电机的微机控制	191
§ 6-1 电机的微机控制概述	191
§ 6-2 电机微机控制中的基础技术	197
§ 6-3 直流电机调速系统的微机控制	209
§ 6-4 SPWM 变频器的微机控制	212
思考题与习题	221
附录 I 坐标变换理论	222
附录 II 异步电机基本方程式	227
参考文献	232

绪 论

人类社会发展的历史进程中,能源永远是人类赖以生存的物质基础,科学技术的进步更是和能源的获取、变换、利用紧密联系在一起。由于电能的生产、变换高效,传输分配容易,使用控制方便,因而获得了最为广泛的应用。电能的生产 and 利用更涉及机械与电两种形态能量之间的转换,电机(电动机、发电机)作为机电能量转换的设备所处位置关键,使得电机技术的发展直接关系到能源的有效变换和利用,能源的开发和节约。

一般而言,电机技术包括电机制造技术和电机控制技术。电机制造技术主要是电机本体的优化设计、加工制造、工艺技术等,涉及较多的传统电工及机械、材料学科的内容。电机控制技术则主要服务于电机的运行、特性控制,最主要是电动机的速度控制和发电机的励磁调节。随着电力电子技术、微电子技术、微机控制技术在电机控制中的应用,电机控制是以电子控制为主要形式,已逐渐成为了一门以电机为机械本体,集信息技术、微电子技术于工作机械于一体的机电一体化技术,更是高新技术改造传统机电技术的重要手段。本书主要讨论电机的电子控制,特别是交流电机的控制技术。

一、电动机的速度控制

现代工业生产中有两种情况需要实现电机的速度控制:

1. 满足运行及生产工艺要求

如对于电动车辆则要求低速恒转矩、高速恒功率;对于电梯、机床、纺织、造纸等传动,特别是轧钢设备则要求正转、反转、电动、制动四象限运行。这是高性能调速技术的应用场合。

2. 实现调速节能

主要针对拖动风机、水泵的电机,过去电机恒速运行,依靠挡板或阀门调节风量或流量,致使大量能量耗费在挡板、阀门上。采用调节速度方式调节流量时,电机输入功率大大减少,产生高达 20%~30% 的节能效果。这是一般性能调速技术的重要应用场合。

按照电机类型的不同,电机的速度控制可区分为直流调速和交流调速。

直流调速即对直流电动机的速度控制。由于直流电动机中产生转矩的两个要素——电枢电流和励磁磁通相互间没有耦合,并可通过相应电流分别控制,因此直流电动机调速时易获得良好的控制性能及快速的动态响应,在变速传动领域中过去一直占据主导地位。然而由于直流电机需要设置机械换向器和电刷,使得直流调速存在固有的结构性缺陷:

(1) 机械换向器结构复杂、成本增加,同时机械强度低,电刷容易磨损,需要经常维护,影响运行可靠性。

(2) 由于运行中电刷易产生火花,限制了使用场合,不能用于化工、矿山、炼油厂等有粉尘、腐蚀、易燃、易爆物质或气体的恶劣环境。

(3) 由于存在换向问题,难于制造大容量、高转速及高电压直流电机,其极限容量与转速乘积被限制在 $10^6 \text{kW} \cdot \text{r/min}$,使得目前 3 000r/min 左右的高速直流电动机,最大容量只能达

(400~500)kW;低速直流电动机也只能做到几千千瓦,远远不能适应现代工业生产向高速大容量化发展的需要。

交流调速即对交流电动机的速度控制。交流电机,尤其是笼型异步电动机,由于结构简单、制造方便、造价低廉、坚固耐用、无需维护、运行可靠,更可用于恶劣的环境之中,特别是能做成高速大容量[其极限容量与转速乘积高达 $(400\sim 600)\times 10^6\text{kW}\cdot\text{r/min}$],因此在工农业生产中得到了极为广泛的应用。但是交流电动机调速、控制比较困难,这是由于同步电动机的气隙磁场由电枢电流和励磁电流共同产生,其磁通值不仅决定于这两个电流的大小,还与工作状态有关;异步电动机则电枢与励磁同在一个绕组,两者间存在强烈的耦合,不能简单地通过控制电枢电压或电流来准确控制气隙磁通进而控制电磁转矩,因而不能有效地实现电机的运动控制。

交流电机调速原理早在20世纪30年代就进行了深入的研究,但一直受实现技术或手段的限制而进展缓慢。早期传统的交流调速多采用电磁装置和水银整流器或闸流管等原始变流元件来实现,最早是绕线式异步电动机转子串电阻调速,在吊车、卷扬机等设备中得到了较为广泛的应用,但这种方法调速时会在电阻上浪费大量电能,运行效率低下。20世纪50年代发展了异步电机定子串饱和电抗器实现调压调速的简单方法,但有转子损耗引起严重发热问题。笼型转子异步电机变极调速是一种高效的调速方法,但速度变化有级,应用范围受到限制。为了提高绕线式异步电机转子串电阻调速的运行效率,20世纪30年代就提出了串级调速的思想。这种方法把原本消耗在外接电阻上的转子滑差功率引出,经整流变为直流电能供给同轴联接的直流电动机,使这部分能量变为机械功加以利用。交流电机变频调速是一种理想调速方法,早在20世纪20年代对此就有明确认识:既能在宽广的速度范围内实现无级调速,也不会调速过程中使运行效率下降,更可获得良好的起动运行特性。但由于当时采用的水银整流器和闸流管性能不理想而未能推广使用,采用旋转变流机也因技术性能不如直流调速而未能使用。

20世纪50年代中期世界上第一只晶闸管研制成功,开创了电力电子技术发展的新时代。从此“电子”进入强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的桥梁与纽带,使得电能的变换、利用更加方便和高效,大大地促进了电机调速与控制技术的飞速发展。首先是直流电机调速系统摆脱了以往笨重的电动发电机组供电形式进步到了可控整流器的简洁供电方式,加上线性集成电路、运算放大器的应用和调节器的优化,直流调速的静、动态性能获得了很大的提高。与此同时,交流电机调速技术的发展也获得了一次飞跃,尤其是20世纪70年代中期全世界范围内出现了能源危机,节约能源成了人们普遍的共识。作为节约电能的重要手段,交流电机调速引起了人们的重视,尤其是拖动风机、水泵、压缩机的交流电机实施以调速来调节流量的运行方式改造后,产生了巨大的节能效果,更为有力地推动了交流调速技术本身的快速发展。

交流电机调速方法众多,技术手段各异,但可从电机运行原理的角度予以合理分类。

对于异步电机而言,根据电机原理,从定子通过气隙传入转子的电磁功率 P_M 可以分为两部分:一部分是轴上的机械功率 $P_2=(1-S)P_M$,这是拖动负载做功的有效功率;另一部分是转子绕组内的滑差功率 $P_s=SP_M$, P_s 与转差 S 的大小成正比。我们可以按照调速过程滑差功率是否增大、真实消耗还是得以回收来划分调速类型。

(1) 滑差功率消耗型。调速过程中全部滑差功率均转换成热能形式,不可逆地被消耗掉,而且消耗越多调速范围越广,当然运行效率越低。常见的调压调速、绕线式异步电机转子串电阻调速、电磁滑差离合器(电磁调速电机)就属于这种调速类型。值得指出的是尽管滑差功率消耗型调速时耗能,但在风机、水泵的调速调流量中仍有巨大节能效果。这是因为离心式风机、水

泵的输入功率是转速的三次方关系,随减小流量而降低转速时电机的输入功率大大减少,抵消掉因调速引起的能耗后仍有 20% 的节能潜力,十分可观。

(2) 滑差功率回馈型。调速时滑差功率的一部分被消耗掉,大部分通过变流装置返回电网或转化为机械功被利用,以此维持较高的运行效率。绕线式异步电机串级调速就属于此类调速方式。

(3) 滑差功率不变型。这种方法主要是通过改变同步转速实现调速,滑差功率消耗水平保持不变,因而是一种真正的高效调速方式,变频调速、变极调速就是具体的方法。变频调速更是交流电机的主要调速方式,以此为基础可以构成许多高性能的交流调速系统。

对于同步电机而言,由于转子速度与旋转磁场速度严格同步而不存在滑差,故只能是滑差功率不变型,且为 $P_s=0$ 的调速,加上同步电机转子极对数固定无法采用变极调速,因而,变频调速是其惟一可行的调速方法。按照变频器频率指令的来源,同步电机变频调速系统又可以区分为它控式及自控式两种,其中自控式同步电机变频调速系统又称无换向器电机,与它控式相比最大优点是转子本身控制了变频器的供电频率,使转子与旋转磁场永远保持同步旋转关系,没有失步问题。

交流电机调速技术的发展总是与电力电子技术和微机控制技术的进步紧密联系,电力电子器件和微机构成了交流调速系统的物质基础。电力电子器件的作用更为关键,可以说新一代的器件带出了新一代的变流器,又推动了新一代交流调速系统的形成。

20 世纪 60 年代初,中、小型异步电机多采用晶闸管调压调速或采用晶闸管可控整流的电磁滑差离合器,取代了传统的饱和电抗器调速;而在中、大容量绕线式异步电机中,多采用晶闸管串级调速装置代替早先机组式串级调速系统,并广泛应用于风机、水泵的调速节能改造。至于变频调速,由于作为第一代电力电子器件的晶闸管没有自关断能力,由它构成的逆变器需要有附加的换流措施,由此产生了几种晶闸管的变频调速装置。最简单的是利用电机反电势换流的自控式同步电机变频调速系统(无换向器电机),这种调速电机在 20 世纪 70 年代就得到了迅速的推广,现在最大单机容量已超过 $1 \times 10^5 \text{ kW}$ 。由于异步电机的输入电流相位总是滞后于端电压,不能利用其反电势帮助逆变器中晶闸管实现换流,必须采用电容强迫换流,使得调速系统电路结构一般比较复杂。这一时期还较多地发展了供单台异步电机变频调速用的串联二极管式电流源型逆变器,供多台异步电机协同调速运行的串联电感式及带辅助换流晶闸管的电压源型逆变器,还有利用电网电压自然换流、适合于低速大容量调速传动的交—交变频器(循环换流器)。这些晶闸管逆变器的输出电流或电压波形通常是矩形波、阶梯波或正弦波拼块,除了基波外还含有较大的谐波成分,会对电机、电网产生严重的谐波负面效应。特别是 5 次、7 次等低次谐波会在异步电机中引起转矩脉动、振动噪声、损耗发热、效率及功率因数下降等不良影响。这些都是由于所采用的晶闸管器件开关频率太低所致,必须从提高开关频率、优化输出波形着手来解决,此时电力电子器件将是关键。

20 世纪 50 年代出现的晶闸管只是一种可控制导通但不能控制关断的半控器件,开关频率又低,但它的通态压降小,可以做成高压大容量,因而在大功率($>1\text{ MW}$)、高电压($\geq 10\text{ kV}$)的交流调速装置中仍有不可替代的地位。20 世纪 70 年代后,各种具有自关断能力的高频自关断器件随着调速节能技术的发展应运而生,主要有电流控制型的大功率晶体管 GTR、门极可关断晶闸管 GTO,电压控制型的功率 MOS 场效应晶体管 Power MOSFET、绝缘栅双极型晶体管 IGBT、MOS 控制晶闸管 MCT 等。由于电压控制(场控)型器件的驱动远比电流控制型简单、方便,因而场控器件更具发展前景。这些器件的开关频率和电压、电容量均已达到相当高

水平,在产品中已获得了广泛应用。它们的开关频率和电压、电流容量简列如下:

GTO 8 000V/10 000A,开关频率 1kHz;

GTR 1 200V/800A,开关频率 5kHz;

Power MOSFET 2 000V/250A,开关频率 >100kHz;

IGBT 3 300V/1 800A,开关频率 20kHz;

MCT 2 500V/1 000A,开关频率 1kHz。

20 世纪 80 年代以后,又出现了新一代电力电子器件——功率集成电路 PIC,它集成了功率开关器件、驱动电路、保护电路、接口电路于一体,发展成了智能化的电力电子模块器件,目前已应用于交流调速中的智能功率模块 IPM 就是采用 IGBT 作功率开关器件,集成电流传感器、驱动电路及过载、短路、过热、欠压等保护电路于一体,简化了接线,减小了体积,实现信号处理、故障诊断、驱动保护等功能,方便了使用,提高了可靠性,是电力电子器件今后发展的方向。

随着高频自关断器件的应用,进一步推动了交流调速中的变流技术和控制策略的发展。首先是脉宽调制(PWM)技术的成熟和应用。脉冲宽度按正弦规律变化的 SPWM 显著地降低了逆变器输出电压中的低次谐波,使电机运行时的转矩脉动大为减小,动态响应加快。由于脉宽调制逆变器把变频与调压结合在一起,输入直流电压无需调节,电源侧可以简单地采用二极管不控整流,从而显著提高了调速系统输入侧功率因数。所用自关断器件开关频率的提高又使逆变器输出谐波次数升高、谐波幅值减小,有效地抑制了输出电力谐波对电机的影响,因而 SPWM 调制技术在中、小型异步电机变频调速中获得了极为广泛的应用。

从电机原理可知,要使交流电机具备优良的运行性能,首先要向电机提供三相平衡的正弦交流电压,当它作用在三相对称的交流电机绕组中时,就能产生三相平衡的正弦交流电流。若交流电机磁路对称、线性,就能在定、转子气隙中建立单一转向的圆形旋转磁场,使电机获得平稳的转矩、均匀的转速和优良的运行特性,这在大电网供电下自然是能得到满足,但在变频器开关过程供电下就有一个发展过程。正弦脉宽调制 SPWM 追求的是给电机提供一个频率可变的三相正弦电压,并未关心电机绕组内的电流和电机气隙中的旋转磁场。另一种电流跟踪型脉宽调制方式则是避开电压的正弦性,直接追求在电机三相绕组中产生频率可变的对称正弦电流,这比只考虑电压波形进了一步。电流跟踪型 PWM 逆变器为电流控制型电压源逆变器,兼有电压和电流控制逆变器的特点,其中滞环控制电流跟踪 PWM 更因电流动态响应快、实现方便而受到重视。为了追求采用逆变器开关切换能在电机内部生成圆形磁场的效果,近期又研究出磁链跟踪型脉宽调制技术。它将逆变器与交流电机作为一个整体考虑,通过对逆变器开关模式的控制,形成不同的三相电压(矢量),使其产生的实际磁通尽可能地逼近理想的圆形磁通轨迹——理想磁链圆,从而使变频器的性能达到了一个更高水平。这种方法采用三相统一处理的电压空间矢量来决定逆变器的开关状态,形成 PWM 波形,操作简单方便,易于实现全数字控制,已呈现取代传统 SPWM 的趋势。

由于交流电机定、转子各相绕组之间耦合紧密,形成一个复杂的非线性系统,使其转矩与电流不成正比,瞬时转矩控制困难,因此导致交流电机调速系统的动态性能不如直流调速系统优良。为了有效地控制交流电机的转矩,改善交流调速系统的动态性能,1973 年德国 F. Blaschke 提出了矢量变换控制方法,它以坐标变换理论为基础,参照直流电机中磁场(磁化电流)与产生电磁转矩的电枢电流在空间相互垂直、没有耦合、可分别控制的特点,把交流电机的三相定子电流(矢量)经坐标旋转变换,也分解成磁化电流分量和与之垂直的转矩电流分量,

通过控制定子电流矢量在旋转坐标系中的位置和大小,即可分别对两个分量加以控制,也就实现了对磁场和转矩的解耦控制,就能和直流电机一样有效地控制电机所产生的瞬时转矩,使之具有较好的动态特性。

矢量控制方法的采用使交流电机调速系统的动态性能得到了显著的改善,开创了用交流调速系统取代直流调速系统的新时代,这无疑是交流传动控制理论上的一个质的飞跃。但是经典的矢量控制方法要进行坐标变换,比较复杂;坐标轴线需要以转子磁链来定向,其计算比较繁琐,精度常受转子参数变化的影响,造成矢量变换控制系统的控制精度随运行状态变化,达不到理想程度,对此各国学者又相继提出了不少新的控制策略,如转差矢量控制、标量解耦控制、转矩直接控制等。这些新的控制方法又进一步改进了交流电机的控制性能,使得现代高性能的交流调速系统的动态性能已完全可能达到甚至超过直流电机调速系统的水平。

高性能的控制策略涉及复杂的变换关系和数学运算,这又促进了微机数字控制技术在交、直流调速传动中的应用和发展。众所周知,常用的电子控制方式有采用模拟电子电路的模拟控制和采用数字电子电路的数字控制。大约在 20 世纪 70 年代之前,交、直流调速系统多采用模拟控制方式,由众多的线性运算放大器、二极管、三极管等模拟器件构成控制器。这种控制装置体积大、可靠性差,特别是存在温度漂移对器件参数的影响而稳定性差,又难于实现信息存储、逻辑判断,复杂的数学运算控制(如矢量变换控制)几乎无法实现。随着数字电路、微机技术的发展,采用计算机软件实现各种规律控制已成可能。大规模集成电路技术的成熟出现了微处理器、微控制器,使得电机的电子控制又走入了一个崭新的数字化阶段。当前,以单片机为主体的微型计算机已成为调速系统数字控制的核心,展现出十分优越的控制性能:

- (1) 数字控制器硬件标准、简洁,成本低,可靠性高;
- (2) 数字控制实现灵活,功能齐全,可以按需编写、更换软件,具有最大的柔性;
- (3) 可实现复杂的逻辑判断、数字运算,使得新型、复杂的控制策略能得以实现。

与模拟控制相比数字控制实时性较差,模拟量数字化时引入的量化误差影响控制精度和平稳性,但随着微机运算速度和字长的提高这些障碍将得到克服。目前广泛采用的微处理器主要类型有美国 INTEL 公司的 MCS-51 系列的八位单片机、MCS-96 系列的 16 位单片机,美国 TEXAS 公司的 TMS320 系列的 16 位、32 位数字信号处理器等,它们的应用和进步大幅度地提高了调速系统的控制性能。

二、发电机的励磁调节

电机控制中另一个有重要意义的领域是励磁调节。现代工业生产和人民生活对发电机的供电质量要求越来越高,发电机励磁系统的好坏更直接影响发电机系统的供电质量和运行稳定性、可靠性。现代同步发电机对励磁系统的要求是多方面的,不但要能及时地根据发电机负荷变化情况调节其励磁电流,维持机端电压在一定水平上,并使各并联运行机组的无功功率得到合理分配,而且要求反应迅速,以利于提高电力系统的静态稳定性。在电力系统和电机内部发生故障和扰动时,更要求励磁系统能作出快速响应,以提高发电机的动态稳定性和安全可靠。这包括在电力系统发生短路或其他原因使机端电压严重下降时要能进行强行励磁,提高电力系统的动态稳定性;在电力系统突甩负荷时能实现强行减磁,以防止发电机端电压的过分升高;在发电机定子绕组出现匝间短路故障时,能快速灭磁以避免事故的扩大。

一般来说,同步发电机的励磁系统包括了两方面的问题,即励磁功率的来源和励磁调节的方式。发电机的励磁功率从外部独立电源获得时称它励式,从发电机本身发出的电功率中获取

时称自励式。它励时要有单独励磁电源,比较复杂,但在发电机端发生短路故障时有较强的励磁能力,有利于发电机运行时的动态稳定性,但为简化励磁系统,现代中、小型同步发电机基本上都采用自励的方式。至于励磁调节方法,过去只有按发电机电压、电流偏差进行调节的比例式调节方式,现在已采用除按电压、电流偏差进行调节外,还引入了电压、电流的导数及转速、频率等信号作为依据的强励调节方式,用以改善电力系统动态性能。在中、小型同步发电机中则广泛采用具有自动调节励磁能力的相复励系统,以保持发电机端电压稳定不变,且在发电机或电网发生短路故障时仍能维持自励并提供一定的强励能力。

交流励磁发电是 20 世纪 90 年代以来开发出的新型励磁方式,它是在异步发电机的转子绕组中采用变频器提供滑差频率的三相交流电以实现励磁,可使发电机在变速的情况下发出恒定电网频率的交流电能;同时采用矢量变换控制技术,实现发电机的有功功率、无功功率独立调节。交流励磁实现的变速恒频发电技术可用于水头或落差有变化、或为避免多泥沙水流对水轮机叶轮冲击损伤的变速运行水力发电系统,以及风速随机变化的风力发电系统。

三、电机控制技术的发展动向

电机的电子控制是一门集电机运行理论、电力电子技术、自动控制理论和微机控制技术于一体的机电一体化技术,随着这些相关技术的飞速进步,电机控制技术正在日新月异地不断发展。目前的发展动向主要表现在:

1. 变流装置

随着一代代自关断器件的陆续产生,调速系统变流装置正朝高电压、大容量、高频化、小型化方向发展,适合中电压($\geq 10\text{kV}$)、大容量($\geq 10\text{MW}$)的变频器已获得应用。随着功率器件开关频率的提高,PWM 调制技术进一步优化,可以获得十分理想的正弦电压输出。变频器电网侧交一直变换虽采用不控整流可使基波功率因数(位移因数)接近于 1,但因输入电流谐波大而使得总功率因数低下。消除对电网的谐波污染、提高系统输入功率因数、优化变频器输入特性已成为当前变频技术关注热点。因此,PWM 整流技术、新型单位功率因数变流器(如矩阵式交—交变换器)的研究、开发已引起广泛关注。

与此同时,如何提高变频器的开关频率也受到重视,特别是大功率逆变器中功率开关频率主要受到开关损耗的限制,如何降低开关损耗是变频器高频化的关键。近年来已研究出了应用谐振原理使功率器件在零电压或零电流下进行开关的软开关技术,其开关损耗接近为零,大大提高了变流器的运行效率。

2. 控制策略

交流电机是一个多变量、强耦合、时变的非线性系统,瞬时转矩控制困难,造成长时间以来其动态性能不如直流电机优良。20 世纪 70 年代提出的矢量变换控制开创了交流电机高性能控制的新时代,但矢量变换控制也有不尽人意之处。1985 年德国学者 Depenbrock 又提出了转矩直接控制,它将电机与逆变器作为一个整体来考虑,采用电压空间矢量方法在定子坐标系内进行磁通、转矩的计算,通过磁链跟踪型 PWM 逆变器的开关切换直接控制磁链和转矩,无须进行定子电流解耦所需的复杂坐标变换,系统控制更为简单、直接,动、静态性能优越,目前正受到广泛的关注。

各类电机闭环控制中常需检测转子速度或磁极位置,因而带来了传感器安装、维护、环境适应性及运行可靠性等诸多问题。为了降低造价并提高可靠性,国外从 20 世纪 70 年代开始进行了无速度传感器控制技术的研究。最初是利用检测定子电压、电流等易测量和电机模型进行

速度估算,后来采用了模型参考自适应方法(MRAS)进行速度辨识,近年已将卡尔曼滤波器理论用于电机的参数辨识。目前无速度传感器技术已应用于商品化变频器之中。

3. 全数字化控制

随着微机运算速度的提高、存储器的大容量化,全数字控制已是电机控制方式的主流方向。目前除采用各类单片微机作为数字控制器核心外,数字信号处理器(DSP)已展现出越来越大的优势。与普通单片机相比,DSP 改变了集成电路结构、提高了时钟频率,采用指令列排队方式来提高运行效率,更集成了硬件乘法器,大大缩短了乘、除运算时间,特别适合于复杂数学运算。近来又增加了 I/O 口,提高了作为微控制器的功能,形成了电机控制专用系列,已在商品变频器中得到了应用。

20 世纪 80 年代后期,又出现了一种精简指令计算机 RISC,它依靠硬件与软件的优化组合,提高了常用基本指令的执行速度,丢弃了一些运算复杂而不常用的指令,实现了在一个给定周期内并行执行多条指令的能力,以此提高了软件总体效率和执行速度,以一种新的方式解决了数字控制实时性问题。

为了解决控制器的小型化,出现了高级专用集成电路 ASIC,如变压变频用的 SPWM 序列波发生器 HEF4752、SLE4520 等,甚至还有包括一个完整控制系统的 ASIC 面市。现在开发各种新一代 ASIC 已成为先进电气公司当前技术竞争的手段。如果用户欲自己开发电机专用控制芯片,现场可编程门阵列 FPGA 是一种有效解决方案。这是一种可以方便实现多次改写的逻辑器件,一片 FPGA 包含有少则几千、多则几十万个逻辑门,可以用来实现非常复杂的运算,替代多块集成电路和分立元件,且具有很强的保密能力。现在,采用 DSP+FPGA+IPM 构成电机控制系统已是一种较先进的硬件格局。

4. 智能控制理论的应用

基于现代控制理论的滑模变结构控制、采用微分几何理论的非线性解耦控制、模型参考自适应控制等均已引入电机控制。但这些方法仍建立在对象精确的数学模型之上,需要大量传感器、观察器,结构复杂,仍无法摆脱系统非线性和参数变化的影响。智能控制无需对象的精确数学模型并具有较强的鲁棒性,近年已被陆续引入电机控制之中,如模糊控制、人工神经网络控制、专家系统等,使电机控制正朝智能化控制方向发展。

第一章 直流电动机的控制

直流电动机由于具有良好的调速特性,宽广的调速范围,长期以来在要求调速的地方,特别是对调速性能指标要求较高的场合,例如轧钢机、龙门刨和高精度机床等传动中得到了广泛的应用。

以前直流电机调速系统采用直流发电机组供电,不仅重量大,效率低,占地多,而且控制的快速性比较差,维护也比较麻烦。近年来随着电力电子技术的迅速发展,已普遍采用了由晶闸管整流器供电的直流电机调速系统,以取代以前广泛应用的交流电动机—直流发电机组供电的系统。特别是采用了由集成运算放大器构成的电子调节器后,晶闸管整流器供电的直流电机调速系统在性能上已远远地超过直流发电机组供电的系统。随着自关断器件的出现,脉宽调制(PWM)调速方式在直流调速系统中得到发展。由于调制频率高,动态响应快,在高性能直流伺服驱动中得到了广泛的应用。近几年微型计算机应用的普及,更为直流电机调速系统实现数字化和高性能化创造了条件。这些都是本章要重点讨论的内容。

§ 1-1 晶闸管供电直流电动机的机械特性

直流电动机是一种具有反电势的负载,晶闸管整流器对反电势负载供电时,电流容易出现断续现象。因为直流电动机晶闸管调速系统在电流断续时的机械特性很软,在闭环控制中往往会出现系统参数失调,产生振荡现象,所以在调速系统中不得不采取一些措施来补救,例如采用多相整流电路,加大平波电感电感量等来防止电流的断续,或者在控制方式中采用自适应控制,使调节器的参数能随电流的断续而自动地发生相应的变化等等。这样,晶闸管供电直流电动机的机械特性就必须按电流连续与否分开来讨论。

一、电流连续时

如果直流电机电枢回路电感足够大,使得可控整流器输出电流连续。在这种情况下,输出整流电压平均值为:

对单相桥式整流

$$U_d = 0.9U \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha$$

对三相半波整流

$$U_d = 1.17U \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha$$

对三相桥式整流

$$U_d = 2.34U \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha$$

式中, U 为电源相电压的有效值。

在电流连续的情况下,由于晶闸管有换流重叠现象,产生了一定的换流重叠压降,相当于

在整流电源内有一个不消耗功率的虚拟电阻 R_c 。在单相全波(或桥式)整流时, $R_c = (2/\pi)L_A\omega$; 在三相半波整流时, $R_c = (3/2\pi)L_A\omega$; 而在三相桥式整流时, $R_c = (3/\pi)L_A\omega$, 其中 L_A 为换流电感。如果再考虑交流电源的等效内电阻 R_0 , 则在电流连续的情况下晶闸管整流器可以等效地看作是一个具有内电势 U_d 、内电阻 $R_c + R_0$ 的直流电源。在这个直流电源供电下, 直流电动机的基本方程式为

$$U_d = (R_c + R_0 + R)I_d + E = R_\Sigma I_d + E \quad (1-1)$$

和

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{1}{C_e \Phi} (U_d - R_\Sigma I_d) = \frac{1}{C_e \Phi} (U_{d0} \cos \alpha - I_d R_\Sigma) \quad (1-2)$$

由式(1-2)可以看出, 在电流连续的情况下, 当整流器移相角 α 不变时, 电动机的转速随负载电流 I_d 的增加而降低。在图 1-1 中绘出了不同移相角 α 时的一簇机械特性曲线, 它们实际上是一组相互平行而向下倾斜的直线, 其斜率为 $|\Delta n / \Delta I_d| = R_\Sigma / C_e \Phi$ 。但是当电流减小到一定程度时, 平波电抗器中贮存的能量将不足以维持电流连续, 电流将出现断续现象, 此时直流电动机的机械特性就会发生很大变化, 它将不再是直线, 图 1-1 中以虚线表示。

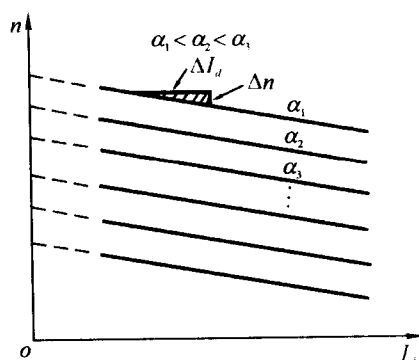


图 1-1 α 恒定时机械特性

二、电流断续时

电枢电流断续时不再存在换流两相晶闸管重叠导

通的现象, 直流电机通电的情况可以用图 1-2 所示的等效电路来分析。在此电路中, 电压 u_2 在单相和三相零式整流电路中是某一相的相电压; 在三相桥式电路中则为某一线电压。由于电机有反电势 E 存在, 显然只有在电源电压的瞬时值 u_2 大于反电势 E 时晶闸管 VT 才能导通, 如图 1-3 所示。

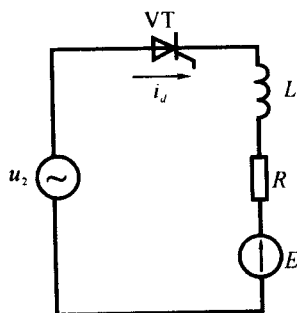


图 1-2 直流电机通电时的等效电路

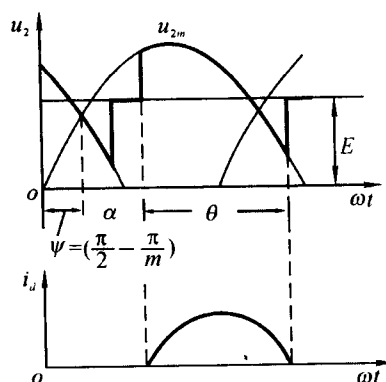


图 1-3 电流断续时的电机电流

为了分析简便起见, 先不计等效电阻 R_Σ 的影响, 于是可以写出回路的电压平衡方程式

$$u_2 = \sqrt{2} U \sin \omega t = E + L \frac{di_d}{dt}$$

式中, U 为电源电压的有效值。

求解以上方程式可得